



22-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2019 m. lapkričio 22-23 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 22th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 22-23 November 2019, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 22-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 22-23 ноябрь 2019 г., Вильнюс, Литва

## SINUSOIDINIŲ SIJŲ PANAUDOJIMO KRANAMS IR POKRANINIAMS KELIAMS TYRIMAS

Andrius Kučiauskas<sup>1</sup>, Justas Bražiūnas<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Transporto Inžinerijos Fakultetas*

*El. paštas: <sup>1</sup>andrius.kuciauskas@stud.vgtu.lt; <sup>2</sup>justas.braziunas@vgtu.lt*

**Santrauka.** Pagrindinė krovimo technikos projektavimo problema yra įrenginio svoris. Reikšmingiausia tiltinio kranas dalis sudaryta iš įrenginio metalinės konstrukcijos, todėl nėra optimalu mažinti atskirų komponentų svorį, tačiau verta optimizuoti ir mažinti kranas sijos svorį. Sinusoidinio tipo sijos yra geras, praktiškas ir taupesnis sprendimas. Jos gali būti pagamintos automatiniai ir greitesniu būdu. Pagrindinis šios sijos elementas – sinusoidinė sienutė, kuri yra žymiai stabilesnė klupdymui. Sienutės storio sumažinimas leidžia sutaupyti apie 20-30% plieno lyginant su standartinėmis konstrukcijomis. Tačiau, sinusoidines sijas labiausiai apsimoka naudoti statant ilgus pokraninius kelius ir didesnę kranų kiekį.

**Reikšminiai žodžiai:** sinusoidinė sija, kranas, pokraninis kelias.

### Įvadas

Vis labiau tobulėjant metalinių konstrukcijų suvirinimo ir gamybos procesams, išauga poreikis kaip įmanoma labiau pritaikyti naujoves kasdieniuose technologiniuose procesuose. Metalinių konstrukcijų optimizavimo poreikis yra ypač ryškus kėlimo ir birių krovinių transportavimo technikoje, taip pat, tiltiniuose kėlimo kranuose.

Pagrindinis šių sijų tyrimo objektas yra sienutės klupdymo pajėgumas ir atsparumas lenkimo momentui. Reikšmingiausius klupdyimo tyrimus atliko (Aggarwal *et al.* 2018), (Easley *et al.* 1969), (Tohany *et al.* 2016) ir (Gorecki *et al.* 2010) – šie tyrėjai išskyrė tris esminius sinusoidinės sijos klupdyimo tipus – globalų, vietinį ir interaktyvų, o tyrimų išvadose buvo pateikti matematiniai modeliai, aprašantys sijų elgseną.

Atliktas tyrimas, kuriame buvo optimizuojamos ir parenkamos kranas bei pokraninio kelio sijos. Atliekant bandymus stengtasi optimizuoti sijas, kad jos būtų kaip įmanoma lengvesnės, bet neprarastų stiprumo savybių.

Šio tyrimo tikslas yra nustatyti, ar sinusoidinio tipo sijos yra tinkamos naudoti kėlimo kranuose.

Atliekant tyrimą nustatyta, kad sinusoidinės sijos yra tinkamos ir gali būti naudojamos kėlimo įrangos projekte. Šios sijos leidžia taupyti metalinių konstrukcijų svorį ir yra žymiai pigesnės, taupymo efektas išryškėja labiausiai, kai naudojami ilgi pokraniniai keliai ir norima statyti bent kelis naujus kranus.

### Teoriniai modeliai aprašantys sinusoidinių sijų elgseną

Plieninės sijos su sinusoidine sienute pasižymi panašiomis į standartinės dvitėjinės sijos savybėmis, tačiau dėl sinusoidinės sienutės formos turi didesnę atsparumą ašinėms ir klupdyimo jėgoms ir gali būti apie 20-30 % lengvesnės, nei panašių stiprumo savybių dėžiniai ir dvitėjiniai analogai. Didelis šių sijų privalumas yra visiškai automatizuota gamyba. Tokio tipo sijos dažniausiai naudojamos statybinėse konstrukcijose, bet nėra plačiai paplitusios.

Pagrindinis sijos elementas yra sinusoidinė sienutė. Ši sienutė pagaminta iš lankstytos 1,5-6,0 mm storio skardos. Dėl sinusoidinės formos, sienutė gali išlaikyti žymiai didesnes ašines jėgas nei plokščios sienutės, o sienutės stiprumas apibūdinamas klupdymu.

Pagal (Aggarwal *et al.* 2018) yra išskiriami trys pagrindiniai klupdyimo atvejai – globalus, vietinis ir interaktyvus. Klupdyimo reiškiniai sienuteje atsiranda tada, kai tangentiniai įtempimai sienuteje viršija leistinus tangentinius įtempimus. Leistinieji tangentiniai įtempimai pagal Von Mizeso kriterijų yra:

$$\tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

čia:  $f_y$  – medžiagos takumo riba.

Vietiniai sienutės klupdyimo įtempimai (1 pav.) gali būti apskaičiuoti pagal formulę. Šiuo atveju sienutė suda-

lijama į atskiras stačiakampes plokšteles, kur kiekviena iš jų gali būti paveikta vietinio klūpdyimo:

$$\tau_L = \frac{k_L \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \left( \frac{t_w}{b} \right)^2, \quad (2)$$

čia  $k_L$  – klūpdyimo koeficientas;  $E$  – medžiagos tamprumo modulis;  $\nu$  – puasono koeficientas;  $t_w$  – sienutės storis;  $b$  – sijos sienutės pusbangės plotis.

(Aggarwal *et al.* 2018) teigia, kad sijos lentynos daugiau veikia šarnyriškai įtvirtintomis sąlygomis nei standžiai įtvirtintomis. Tačiau, kai kurie tyrėjai teigia, kad klūpdyimo koeficientas gali būti artimesnis vidurkiui tarp šarnyriško/standaus įtvirtinimo ir absoliučiai standžiai įtvirtintos plokštės. Praktikoje pločio ir aukščio koeficientas  $b/h$  yra labai mažas, todėl priimama, kad klūpdyimo koeficientas yra  $k_L = 5,34$ .

Globalus klūpdyimas (1 pav.) atsiranda tuomet, kai vietinio klūpdyimo židiniai paplinta po visą skerspjūvio ilgį. Šiuo atveju būtina užtikrinti, kad sienutės plokštelės tolygiai palaikytų viena kitą.

Pagal (Easly *et al.* 1969) – globaliniai klūpdyimo įtempimai gali būti apskaičiuoti pagal formulę:

$$\tau_G = k_G \frac{(D_x D_y)^{0.25}}{t_w h^2}, \quad (3)$$

čia:  $k_G$  – globalaus klūpdyimo koeficientas;  $D_x$  ir  $D_y$  – atitinkamai lenkimo standumas x ir y kryptimis;  $t_w$  – sijos sienutės storis;  $h$  – sienutės aukštis.

Kiti tyrėjai kaip (Driver *et al.* 2006) išskyrė kitokią klūpdyimo įtempimų lygtį:

$$\tau_G = k_G \frac{E t_w^{0.5} b^{1.5}}{12 \cdot h^3} \cdot F(\alpha, \beta), \quad (4)$$

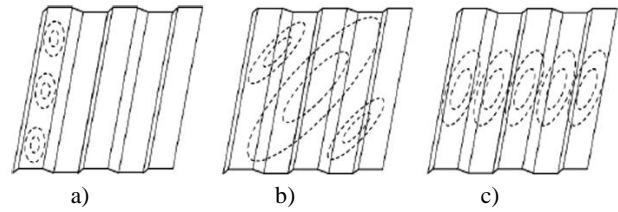
čia:  $k_G$  – globalaus klūpdyimo koeficientas;  $E$  – medžiagos tamprumo modulis;  $b$  – sijos sienutės pusbangės plotis;  $h_w$  – sienutės aukštis;  $F(\alpha, \beta)$  – bedimensinis geometrinis koeficientas.

Pagal (Tohany *et al.* 2016) daroma prielaida, kad sienutei galioja izotropiškumo principas – bet kuriame taške medžiagos savybės bus vienodos visomis kryptimis. Tai reiškia, kad pridėjus jėgą viena ašimi, reikšmingiausios deformacijos pasireiškė toje pačioje ašyje. Smulkios skersinės deformacijos pasireiškia kitose ašyse. Taip pat šlyties įtempimai sukelia tik šlyties deformacijas. Tai reiškia, kad normaliniai įtempimai ir deformacijos nėra tiesiogiai susiję su šlyties įtempimais ir deformacijomis. Deformacijos priklauso nuo dviejų nepriklausomų tampriųjų konstantų  $E$  ir  $\nu$

Interaktyvus klūpdyimas (1 pav.) yra pastebėtas kai kurių tyrėjų, tačiau tai ypač retas ir mažai aprašytas reiškinys. Tai yra hibridinis klūpdyimas, sudarytas iš globalaus ir vietinio klūpdyimo, kai vietinis klūpdyimas atsiranda vienoje plokštelėje, tačiau išplinta ir į kitas plokšteles. Paprasčiausias interaktyvaus klūpdyimo matematinis formulavimas yra toks.

$$\left( \frac{1}{\tau_I} \right)^n = \left( \frac{1}{\tau_L} \right)^n + \left( \frac{1}{\tau_G} \right)^n + \left( \frac{1}{\tau_V} \right)^n, \quad (5)$$

čia:  $n$  – klūpdyimo eksponentė.



**1 pav.** Klūpdyimo pavyzdžiai, a – vietinis klūpdyimas; b – globalinis klūpdyimas; c – interaktyvus klūpdyimas.

Įtempiai sinusoidinėse sijose pasiskirsto skirtingai nei dvitėjuose ar dėžiniuose profiliuose. Įprastuose profiliuose lenkimo momentas priimamas visame skerspjūvyje o lenkimo įtempimai yra vienodi apatiniame ir viršutiniame sluoksnyje.

Pagal (Gorecki *et al.* 2010) reikšmingiausią lenkimo momento dalį priima tik sijos lentynos. Taip yra todėl, kad sienutė veikia armonikos efekto principu. Sienutė perduoda tik skersines jėgas tarp apatinės ir viršutinės lentynos.

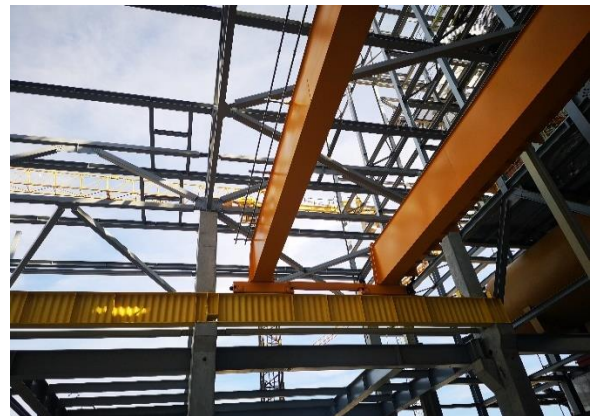
Tangentiniai įtempiai tarp skirtingų sijų pasiskirsto nevienodai. Standartiniuose profiliuose tangentiniai įtempimai turi parabolės formą kur didžiausi įtempimai susikoncentruoja ties sienutės viduriu. Sinusoidinėje sijoje tangentiniai įtempimai yra sąlyginai didesni nei standartinėse sijose, tačiau jų forma yra beveik tiesi linija.

Norint validuoti sijos lentynų lenkimo pajėgumą reikia įvertinti gniuždomų lentynų stiprumą pagal normalinius įtempimus, globalų ir vietinį klūpdyimą. Sukamasis klūpdyimas įvertinamas pagal gniuždymo lentynos klūpdyimą. Tačiau toks vertinimas yra ganėtinai preliminarus, nes yra nevertinamas sukamasis sijos standumas (Pasternak *et al.* 2010).

## Praktinis sijų pritaikymas kranams ir pokraniniams keliams

Pagrindinė priežastis pritaikyti sinusoidines sijas yra susijusi su plieno svorio taupymu. Tinkamai parinkus siją galima sutaupyti nuo 20 iki 30 procentų plieno lyginant su įprastinėmis metalinėmis konstrukcijomis.

Kauno Kogeneracinėje jėgainėje pastatytas 24 tonų keliamumo dviejų sijų atraminis kranas (2 pav.). Pokraninis kelias suprojektuotas ir pagamintas iš sinusoidinių sijų. Pokraniniam keliui naudojamos 8 m ir 7,5 m ilgio sijos WTC750-300x12.



**2 pav.** Pokraninis kelias iš sinusoidinių sijų Kauno Kogeneracinėje jėgainėje.

Kauno laisvojoje ekonominėje zonoje esančioje įmonėje AXIOMA METERING pastatytas 2 tonų keliamumo vienos sijos atraminis kranas, kurio pokraninis kelias pagamintas iš 6 m ilgio sijų WTC333x250-8, kranas sija pagaminta iš 17,5 m ilgio WTC625x250x15 sijos (3 pav.)



3 pav. Pokraninis kelias ir kranas sija iš sinusoidinių sijų Kauno Laisvojoje Ekonominėje Zonoje.

Projektuojant sinusoidines sijas reikia žinoti, kad dar nėra galutinai sukurtų ir standartizuotų skaičiavimo metodikų, o esami norminiuose dokumentuose esantys skaičiavimai nėra labai tikslūs, todėl dažnai tenka remtis įvairia programine įranga. Prieš tai minėtų pavyzdžių sijos buvo parinktos remiantis standartais. Standartas EN 1993-1-5 (Eurokodas 3) aprašo sijų atsparumą ašinėms ir lenkimo jėgoms. Bendra lenkimo momento pajėgumo išraiška aprašoma pagal formulę:

$$M_{y,Rd} = \min \begin{cases} \frac{b_2 t_2 f_{y,f}}{\gamma_{M0}} \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); & \text{tempinama lentyna} \\ \frac{b_1 t_1 f_{y,f}}{\gamma_{M0}} \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); & \text{gniuždoma lentyna} \\ \frac{b_1 t_1 \chi f_{sf}}{\gamma_{M1}} \left( h_w + \frac{t_1 + t_2}{2} \right); & \text{gniuždoma lentyna} \end{cases} \quad (6)$$

čia:  $b$  – sijos lentynos plotis;  $t$  – sijos lentynos storis;  $f_{y,f}$  – medžiagos takumo riba;  $h_w$  – sienutės aukštis;  $\gamma_{M0}$  – eksploatacijos koeficientas;  $\gamma_{M1}$  – eksploatacijos koeficientas;  $\chi$  – redukcijos faktorius.

Atsparumas ašinėms jėgoms aprašomas pagal formulę:

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \frac{f_w}{\gamma_{m1} \sqrt{3}} h_w t_w, \quad (7)$$

čia:  $\chi_c$  – redukcijos koeficientas;  $f_w$  – medžiagos takumo riba;  $\gamma_{m1}$  – eksploatacijos koeficientas;  $h_w$  – sienutės aukštis;  $t_w$  – lentynos storis.

Siekiant supaprastinti skaičiavimų metodiką, šie rodikliai yra apskaičiuoti visoms sijų variacijomis. ZEMAN & Co GmbH – pagrindinis sinusoidinių sijų gamybos proceso plėtotojas standartizavo šių sijų matmenis ir parametrus, kurie yra laisvai prieinami gamintojo techninėje dokumentacijoje.

Zeman & Co GmbH – pagrindinis sinusoidinių sijų gamybos proceso plėtotojas standartizavo šių sijų matmenis ir parametrus. Techninėje dokumentacijoje galima rasti lentelių, kuriose apskaičiuoti pagrindiniai šių sijų stipruminiai parametrai ir, kuriomis galima remtis projektuojant konstrukcijas. Ši techninė dokumentacija remiasi prieš tai minėtu standartu EN 1993-1-5

Stiprumo parametrai skaičiuojami pagal standartą EN 1993-1-1 (Eurokodas 3), šiuo atveju sija turi tenkinti tam tikras sąlygas, lenkimo sąlyga:

$$\frac{M_{ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1.0, \quad (8)$$

čia:  $M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$ ;  $M_e$  – lenkimo momentas;  $W_{pl}$  – plastinis atsparumo momentas;  $f_y$  – medžiagos takumo riba;  $\gamma_{M0}$  – eksploatacijos koeficientas.

Gniuždymo sąlyga:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0, \quad (9)$$

čia:  $V_{c,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$ ; kur  $A_v$  – gniuždymo plotas;  $f_y$  – medžiagos takumo riba;  $\gamma_{M0}$  – eksploatacijos koeficientas.

Skersinio klupdymo sąlyga:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0, \quad (10)$$

čia:  $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}$ ;  $\chi_{LT}$  – klupdymo redukcijos koeficientas;  $W_y$  – atsparumo momentas,  $f_y$  – takumo riba;  $\gamma_{M1}$  – eksploatacijos koeficientas.

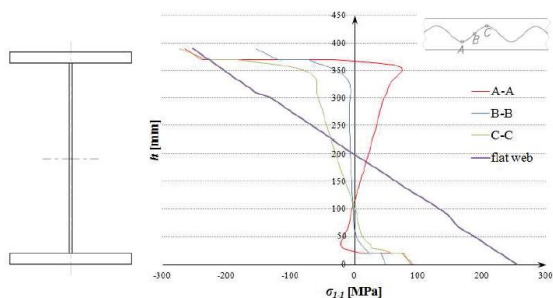
Apkrovos į kranos sijos apatines lentynas skaičiuojamos pagal standartą EN 1993-6, tačiau dar nėra sukurtos tikslios sijos vietinio lenkimo skaičiavimo metodikos, todėl yra remiamasi standartu, kuris skaičiuoja standartinės dvitėjes sijas, bet daroma prielaida, kad lenkimo jėgos petys yra didesnis. Įtempimai ašine ir skersine kryptimi skaičiuojami pagal

$$\begin{cases} \sigma_{ox,Ed} = c_x F_{zEd} / t_1^2 \\ \sigma_{oy,Ed} = c_y F_{zEd} / t_1^2 \end{cases} \quad (11)$$

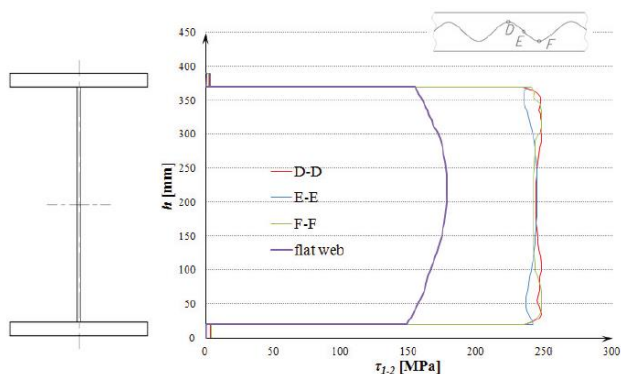
čia:  $c_x, c_y$  – krypties koeficientai kurie parenkami pagal standarto nurodymus;  $F_{zEd}$  – ašinė jėga;  $t$  – lentynos storis.

Rezultatai turi būti patikrinti programinės įrangos paketais. Šiuo atveju, buvo naudotas SOLIDWORKS programinis paketas.

Skaičiavimai parodė, kad įtempimai sijoje pasiskirsto visiškai skirtingai nei įprastuose dvitėjuose profiliuose. Šiuo atveju, lenkimo momentą priima tik sijos lentynos, o sienutė perduoda tangentines jėgas tarp lentynų (4 pav.). Sijos sienutė, dėl savo formos, veikia armonikos principu, lenkimo metu ji nesipriešina išorinėms jėgoms taip kaip dvitėjuose profiliuose. Tangentiniai įtempimai sijos sienutėje pasiskirsto skirtingai nei dvitėjuose profiliuose. Įprastu atveju, tangentinių įtempimų diagrama primena pusmėnulį, kurio centre įtempimai bus patys didžiausi. Sinusoidinėje sienutėje įtempimai pasiskirsto tiesiškai, bet yra sąlyginai didesni nei standartinėse sijose (5 pav.).



4 pav. Normalinių įtempimų pasiskirstymas sinusoidinėje ir plokščiasienėje sijoje.



5 pav. Tangentinių įtempimų pasiskirstymas sinusoidinėje ir plokščiasienėje sijoje.

### Išvados

- Sinusoidinė sija tinkama naudoti kėlimo technikoje, ypač kranuose ir pokraniniuose keliuose, įtempimai sijoje pasiskirsto skirtingai nei dėžiniuose ar dvitėjuose profiliuose dėl sienutės „armonikos“ efekto, tačiau taikant standartų ir straipsnių siūlomas skaičiavimo metodikas galima sėkmingai taikyti sinusoidines sijas praktikoje.

- Sinusoidinės sijos gamybos kaina yra apie 30-40 procentų mažesnė nei dėžinių ar dvitėjų analogų, tačiau didžiausias metalo kiekio sumažėjimas ir ekonominis efektas jaučiamas statant pakankamai ilgus pokraninius kelius ir didelį kėlimo kranų kiekį.
- Dėl išsamesnių tyrimų nepakankamumo, šias sijas galima naudoti tik iki A4 darbo režimo. Taikant didesnius darbo režimus, būtina atsižvelgti į sijų savuosius svyravimus ir nuovargio parametrus.

### Literatūra

- Aggarwal, K.; Wu, S.; Papangelis, J.P. 2018. Finite element analysis of local shear buckling in corrugated web beams, *Engineering structures* 162:37-50.
- Driver, R.G.; Abbas, H.H.; Sause, R. 2006. *Shear behavior of corrugated web bridge girders*. J Struct Eng; 132(2):195–203.
- Easley, J.T.; McFarland, D.E. 1969. *Buckling of light-gage corrugated metal shear diaphragms*. J Struct Div; 95(ST7):1497–516.
- EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: General rules – Plated structural elements.
- EN 1993-6: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures.
- Gartner. SINBEAM (Corrugated web beam) – technical documentation.
- Gorecki, M.; Pienko, M.; Lagoda, G. 2010. *Numerical Analysis of Beam with Sinusoidally Corrugated Webs*.
- Pasternak, H.; Kubieniec, G. 2010. Plate girders with corrugated webs. *Journal of civil engineering and management*, 16(2): 166-171.
- Tohany, S. A.; Abdel-Halim, A. M.; Saddek, A. B.; Hamed, A. Y. 2016. Interactive shear buckling of corrugated webs. *Minia Journal of engineering and technology*, vol.35, No.2, July 2016.